

Simulations expérimentale et numérique de réfractaires verriers électrofondus riches en zircon

Virginie Moreno-Lucas^a, Michel Boussuge^b

^a Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, EVRY, virginie.moreno@ensmp.fr

^b Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, EVRY, michel.boussuge@ensmp.fr

RESUME :

Les réfractaires électrofondus à Très Haute Teneur en Zircon sont utilisés dans la construction des fours verriers. Le fond de la zone fusion est constitué de dalles de THTZ (88%_{vol} ZrO₂, 12%_{vol} phase vitreuse), matériau choisi pour sa faible conductivité thermique, sa forte réfractarité et son inertie chimique.

Le THTZ est élaboré par électrofusion, coulé dans des moules puis refroidi de manière contrôlée jusqu'à température ambiante, domaine où le matériau se caractérise par un comportement fragile. Lors de la première mise en chauffe du four ("attrempage"), des contraintes internes d'origine thermique sont générées au sein des dalles. L'objectif de l'étude est alors d'estimer ce champ de contraintes.

L'étude a tout d'abord consisté à simuler expérimentalement la chauffe d'une dalle de THTZ dans un four verrier pendant l'attrempage. Pour ce faire, nous avons développé et utilisé un dispositif expérimental consistant à poser une dalle de THTZ instrumentée en thermocouples sur une plaque chauffée à une vitesse contrôlée. Les données thermiques ainsi obtenues ont permis, via un calcul numérique thermique (code de calcul ZéBuLoN, Centre des Matériaux), de déterminer les coefficients d'échange aux interfaces dalle/air et dalle/plaque chauffante. Puis, à partir de cela, un calcul numérique mécanique nous a permis de déterminer les contraintes générées par l'attrempage dans la dalle.

MOTS-CLES : Réfractaires électrofondus, simulation numérique, contraintes.

TEXTE ETENDU :**Introduction**

Les réfractaires électrofondus à Très Haute Teneur en Zircon (THTZ), développés et élaborés par Saint-Gobain, sont utilisés dans la construction des fours verriers. Le fond de la zone fusion des fours à verres spéciaux est constitué de dalles de THTZ (88%_{vol} ZrO₂, 12%_{vol} phase vitreuse), matériau choisi pour sa faible conductivité thermique, sa forte réfractarité et son excellente résistance à la corrosion par le verre.

Le THTZ est élaboré par électrofusion : ce procédé de fabrication consiste à fondre un mélange de poudres, à le couler dans des moules, puis à refroidir l'ensemble de manière contrôlée jusqu'à température ambiante, domaine où le matériau se caractérise par un comportement fragile. Le refroidissement de ces structures massives (500x600x100 mm) génère des contraintes internes (résiduelles) dans les dalles, auxquelles s'ajoutent lors de la première mise en chauffe du four (« attrempage »), des contraintes transitoires d'origine thermique. L'objectif de l'étude est alors d'estimer, via la simulation numérique, le champ de contraintes résultant, afin de prévoir le comportement des dalles en service.

L'attrempage

Dans cet article, nous nous intéresserons aux contraintes induites par l'attrempage. Lorsque l'on observe une structure de four verrier (Figure 1), lors de la première chauffe, les dalles du fond de la zone fusion « voient » leur face supérieure chauffée, tandis que la face inférieure est supportée mécaniquement et thermiquement par la sole du four.

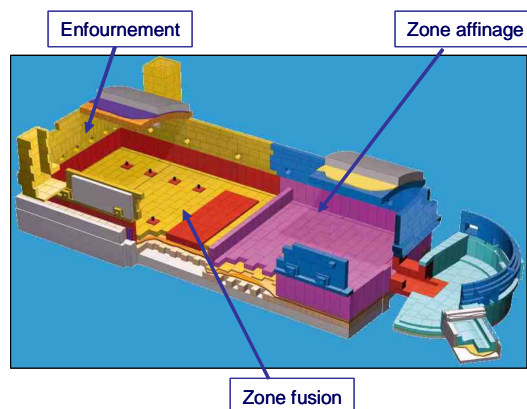


Figure 1 : Schéma d'un four à verres spéciaux

Simulation expérimentale

Nous avons développé un dispositif expérimental représentatif de cette étape d'utilisation des dalles. Une dalle est posée sur une plaque de Dural de 30 mm d'épaisseur, elle-même positionnée sur un four à éléments chauffants en Chromite de Lanthane. On asservit la vitesse de chauffage de la plaque de dural. De plus, dans le but d'assurer un transfert uniaxial vertical de la chaleur, la dalle est isolée latéralement. Enfin,

quatre thermocouples centraux sont placés à différentes profondeurs de la dalle (figure 2), afin de rendre compte de l'évolution du champ de température à travers son épaisseur.

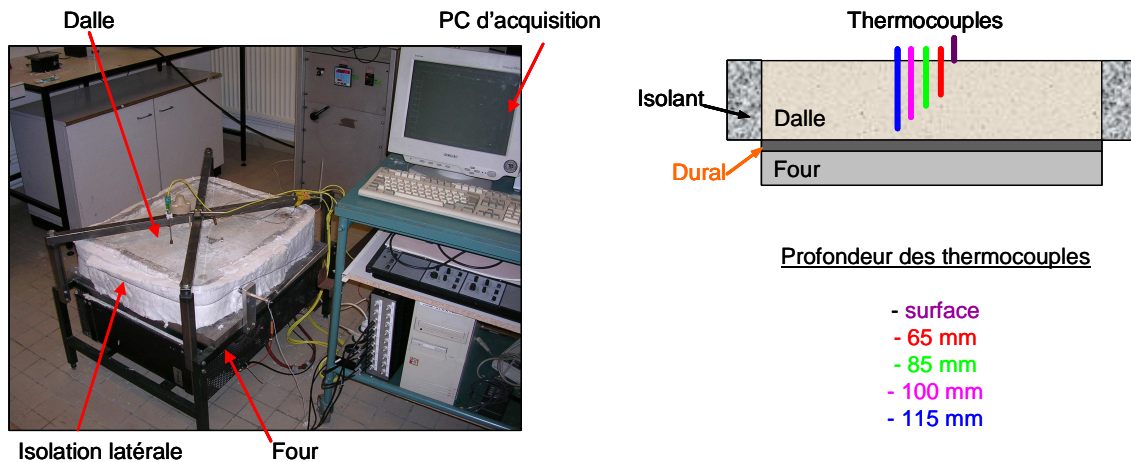


Figure 2 : Montage expérimental de simulation d'attrempage

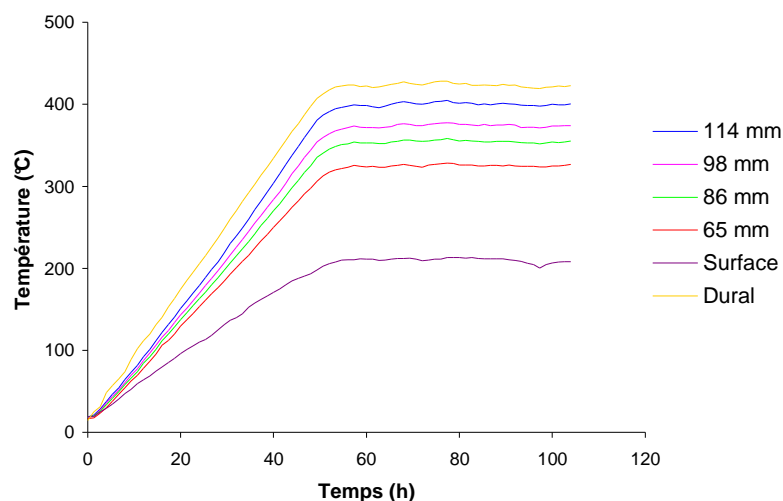


Figure 3 : Evolution des températures dans la dalle durant la simulation expérimentale d'attrempage

Simulation numérique thermique

Dans un second temps, une simulation numérique par éléments finis de notre essai a été réalisée. Le code de calcul ZéBuLoN, du Centre des Matériaux, nous a permis de construire un maillage 3D d'une dalle. Les conditions aux limites thermique et mécanique ont été prises en compte dans le calcul : isolation des faces latérales, transfert dural/dalle caractérisé par un coefficient de transfert de chaleur h_{dd} , convection libre sur la face supérieure (h_{da}), dalle en appui simple sur la plaque et donc libre de se dilater.

Un calcul thermique a tout d'abord permis d'ajuster par approximations successives (méthode inverse) le coefficient d'échange thermique dural/dalle h_{dd} de telle manière que, pour une vitesse de chauffage de la plaque de dural donnée, la simulation numérique et l'expérience soient en accord sur le thermocouple le plus chaud, i.e. le plus près de l'interface dural/dalle. On procède de la même manière pour identifier le

coefficient d'échange dalle/air h_{da} à l'aide des thermocouples les plus froids. Puis on valide finalement la simulation de la diffusion de la chaleur dans la dalle grâce aux mesures fournies par les autres thermocouples. La Figure 4 illustre le bon accord finalement obtenu entre simulation et expérience.

Le champ de température mesuré dans la dalle pendant la simulation d'attrempage sert alors de base au calcul thermoélastique des contraintes, via le champ de déformation thermique.

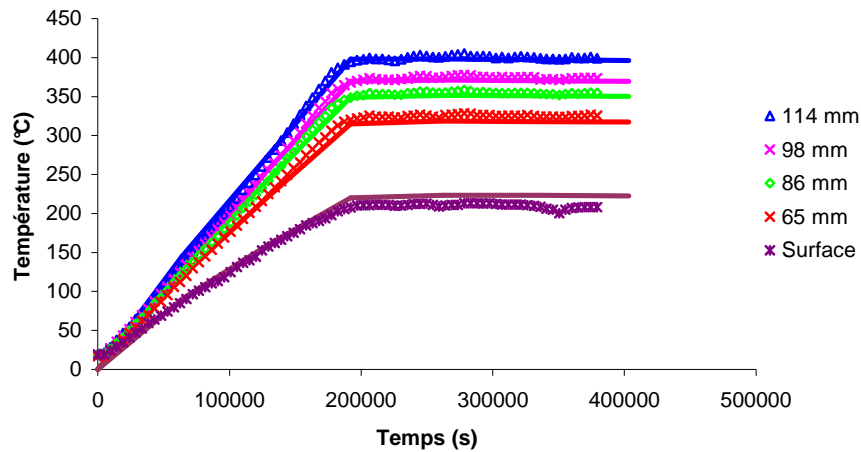


Figure 4 : Comparaison des températures mesurées et simulées après optimisation des coefficients d'échange h_{dd} et h_{da}

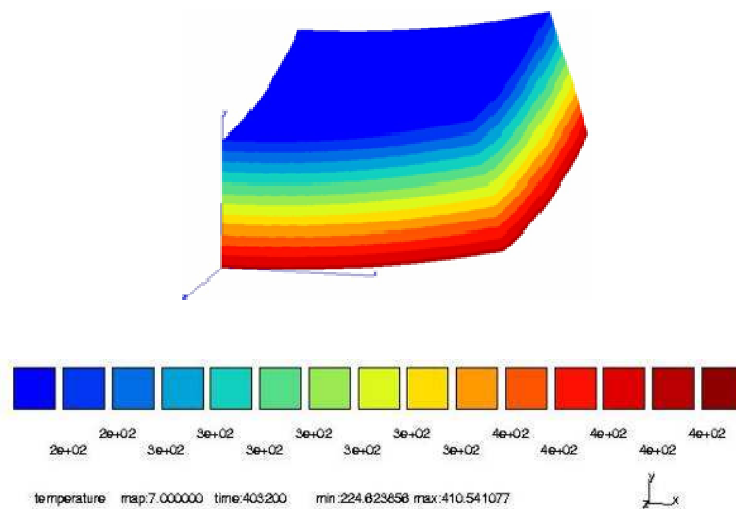


Figure 5 : Température et déformée (x100) de la dalle à l'atteinte de la température maximale

Remarque : Seul un quart de dalle est représenté, axe (Oy) \equiv axe de symétrie de la dalle.

Les résultats du calcul thermique, illustrés par la Figure 5, prouvent que le transfert de la chaleur se fait de manière uniaxiale dans la dalle. Totalement libre de se déformer et soumise à cette distribution de température, la dalle prend la forme d'un paraboloïde, la concavité étant côté face froide. La flèche maximale, prise par les coins supérieurs de la dalle n'excède pas 1,2 mm.

Simulation numérique thermomécanique

L'évolution du champ de température dans la dalle durant l'attrempage est alors utilisée pour calculer les contraintes d'origine thermique, illustrées par la Figure 6.

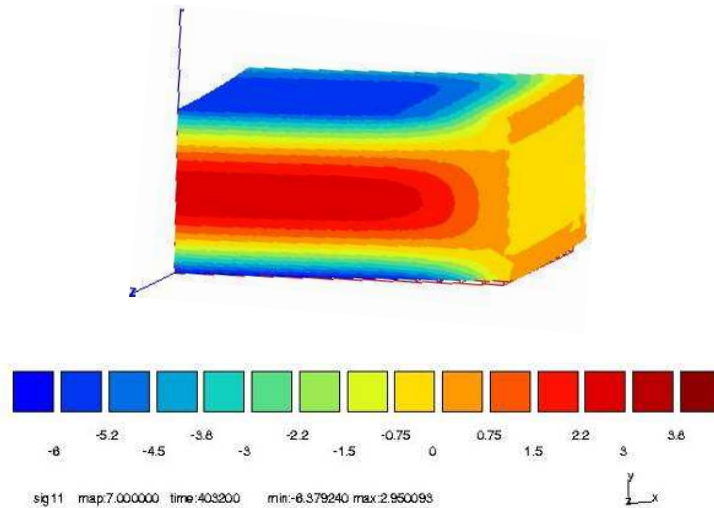


Figure 6 : Champ de contraintes σ_{xx} dans la dalle à l'atteinte de la température maximale

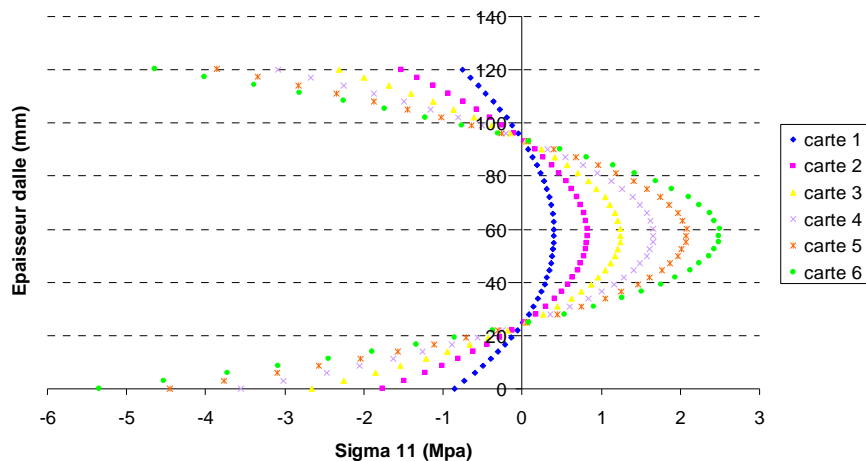


Figure 7 : Evolution du champ de contraintes σ_{xx} dans l'épaisseur de la dalle au cours du chauffage

L'évolution des contraintes dans l'épaisseur de la dalle au cours du chauffage est représenté par la Figure 7. Au cours de cet essai, la face chauffée se dilate, générant ainsi des contraintes de compression. La dilatation de cette face entraîne la flexion de la dalle et place alors la face supérieure en compression. La dalle étant totalement libre de se dilater dans les trois directions de l'espace, les contraintes s'équilibrent et le cœur de la dalle se retrouve en traction.

Néanmoins, bien que l'attrempage génère des contraintes dans la dalle, ces dernières ne dépassent pas quelques MPa. On peut alors en conclure que, si l'attrempage induit un champ de contraintes analogue à celui créé par le refroidissement (hypothèse à confirmer par le calcul numérique), la valeur des contraintes d'attrempage demeure faible. Cette observation confirme donc la nécessité prendre en compte les contraintes résiduelles en fin de refroidissement pour prévoir le comportement des dalles en conditions d'utilisation. Ce travail est actuellement en cours.

Conclusion et perspectives

Grâce à l'essai de simulation d'attrempage, nous avons obtenu un ordre de grandeur des contraintes générées lors de l'attrempage réel d'un four verrier. Nous allons désormais extrapoler ces résultats au cas réel d'attrempage dans lequel le chauffage est réalisé par l'air. Parallèlement, un calcul élasto-viscoplastique endommageable du refroidissement des dalles est en cours, en vue d'estimer les contraintes résiduelles induites par le procédé.